

Procédé pour générer un champ d'ondes prédéterminé.

La présente invention est relative aux procédés pour générer des champs d'ondes prédéterminés dans un milieu.

Le champ d'ondes en question peut consister en une impulsion d'onde focalisée en un ou plusieurs points du milieu, ou il peut s'agir d'un champ spatio-temporel plus complexe.

Plus particulièrement, l'invention concerne un procédé pour générer un champ d'ondes objectif prédéterminé dans un milieu (homogène ou hétérogène) au moyen d'un premier réseau comprenant au moins un transducteur, ce procédé comprenant une étape d'apprentissage au cours de laquelle on détermine, en transmettant des ondes dans le milieu entre le premier réseau et un deuxième réseau comprenant au moins un transducteur (le deuxième réseau peut éventuellement comprendre des transducteurs communs avec le premier réseau), des signaux  $e_i(t)$  à émettre par chaque transducteur  $i$  du premier réseau pour générer ledit champ d'ondes prédéterminé dans le milieu.

Le document WO-A-02/32316 décrit un exemple d'un tel procédé, dans lequel l'étape d'apprentissage susmentionnée permet de déterminer des signaux à appliquer aux transducteurs du premier réseau pour focaliser une impulsion d'ondes respectivement sur chaque transducteur du deuxième réseau, ce qui permet ensuite de déterminer comment focaliser des impulsions d'ondes en d'autres points du milieu pour imager ce milieu par ondes ultrasons. Ce procédé connu donne toute satisfaction au plan de ses résultats, mais nécessite toutefois des moyens de calcul importants et implique en outre des temps de calcul assez longs au cours de l'étape d'apprentissage.

La présente invention a notamment pour but de pallier ces inconvénients.

A cet effet, selon l'invention, un procédé du genre en question est caractérisé en ce que l'étape  
5 d'apprentissage comprend la séquence de correction suivante :

(a) faire émettre simultanément par chaque transducteur  $i$  du premier réseau un signal  $e_i(t)$  déterminé par avance (ces signaux  $e_i(t)$  peuvent initialement être  
10 prédéterminés ou précédemment déterminés par voie expérimentale comme décrit ci-après, ou ces signaux peuvent résulter de l'étape (g) ci-dessous d'une itération antérieure de la séquence de correction) et permettant de générer un champ d'ondes réel proche du champ d'ondes  
15 objectif dans le milieu, ce champ d'ondes objectif correspondant à un signal objectif  $o_j(t)$  pour chaque transducteur  $j$  du deuxième réseau,

(b) faire capter par chaque transducteur  $j$  du deuxième réseau un signal  $r_j(t)$  résultant du champ d'ondes  
20 généré par les signaux  $e_i(t)$ ,

(c) déterminer un signal de différence temporellement inversé  $d_j(-t)$ , pour chaque transducteur  $j$  du deuxième réseau,  $d_j(-t)$  étant l'inversion temporelle de la différence  $d_j(t) = r_j(t) - o_j(t)$ ,

25 (d) faire émettre simultanément le signal de différence temporellement inversé  $d_j(-t)$  par chaque transducteur  $j$  du deuxième réseau,

(e) faire capter un signal  $c'_i(t)$  par chaque transducteur  $i$  du premier réseau à partir des ondes  
30 générées par les signaux de différence temporellement inversés  $d_j(-t)$ ,

(f) déterminer un signal de correction  $c_i(t) = \beta \cdot c'_i(-t)$  pour chaque transducteur  $i$  du premier

réseau,  $c'i(-t)$  étant l'inversion temporelle du signal capté  $c'i(t)$  et  $\beta$  étant un nombre réel positif non nul choisi de façon que  $\beta < (\|\bar{e}\| \|\bar{d}\|) / (\|\bar{r}\| \|\bar{c}\|)$ , où  $\bar{e} = [ei(t)]$ ,  $\bar{d} = [dj(t)]$ ,

$\bar{r} = [rj(t)]$ ,  $\bar{c} = [c'i(t)]$  et  $\| \|$  désigne une norme vectorielle,

- 5 (g) corriger le signal  $ei(t)$  en lui soustrayant  $ci(t)$ .

Grâce à ces dispositions, on parvient à générer très précisément le champ d'ondes objectif, après une ou plusieurs itérations de la séquence de correction et ce  
10 même dans un milieu de propagation très dissipatif et/ou hétérogène.

Dans des modes de réalisation préférés de l'invention, on peut éventuellement avoir recours en outre à l'une et/ou à l'autre des dispositions suivantes :

- 15 - la séquence de correction est répétée plusieurs fois ;

- la séquence de correction est précédée d'une étape initiale au cours de laquelle on détermine expérimentalement une première valeur du signal  $ei(t)$  pour  
20 chaque transducteur  $i$  du premier réseau ;

- au cours de l'étape initiale, on détermine l'inversion temporelle  $oj(-t)$  du signal objectif pour chaque transducteur du deuxième réseau, on fait émettre ladite inversion temporelle  $oj(-t)$  du signal objectif par  
25 chaque transducteur  $j$  du deuxième réseau, on fait capter par chaque transducteur  $i$  du premier réseau un signal  $e'i(t)$  résultant du champ d'ondes généré par les signaux  $oj(-t)$ , et on détermine le signal  $ei(t) = e'i(-t)$  pour chaque transducteur du premier réseau,  $e'i(-t)$  étant l'inversion  
30 temporelle du signal  $e'i(t)$  ;

- la norme vectorielle est définie comme suit :

$\|\bar{x}\| = \|[x_m(t)]\| = \text{Max}(|x_m(t)|)$ , où  $|x_m(t)|$  désigne l'amplitude du signal  $x_m(t)$  ;

- le champ d'ondes est un champ d'ondes

acoustiques ;

- le champ d'ondes est un champ d'ondes électromagnétiques ;

- les ondes sont générées par un système de télécommunication.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront au cours de la description suivante d'une de ses formes de réalisation, donnée à titre d'exemple non limitatif, en regard du dessin joint.

Sur le dessin, la figure 1 est un schéma de principe représentant un exemple de dispositif permettant de mettre en œuvre l'invention.

Le dispositif 1 de génération d'ondes représenté sur le dessin peut être notamment :

- un dispositif de génération d'ondes acoustiques, auquel cas il peut s'agir par exemple d'un dispositif d'imagerie ultrasonore, d'un dispositif de sonorisation, d'un dispositif anti-bruit actif, d'un dispositif de thérapie ultrasonore (par exemple, lithotritie), ou d'un dispositif de communication, notamment sous-marine, par ondes acoustiques,

- ou, le cas échéant, un dispositif de génération d'ondes électromagnétiques, auquel cas il peut s'agir d'un dispositif de télécommunications.

Le dispositif 1 est destiné à générer des ondes dans un milieu 2, qui suivant le cas, peut être :

- une partie d'un corps humain ou animal à imager ou à traiter (imagerie médicale ultrasonore ou thérapie ultrasonore),

- une partie d'un objet à imager (imagerie industrielle ultrasonore),

- le milieu sous-marin ou souterrain (télécommunications par voie acoustique),

- un lieu public ou privé (sonorisation ou système anti-bruit actif),
- une partie de la surface terrestre avec les couches basses correspondantes de l'atmosphère (télécommunications radio entre des bases fixes et des mobiles),
- la surface terrestre et l'atmosphère y compris ses couches hautes (télécommunications terrestres à longue distance par voie radio ou télécommunications radio entre la terre et un ou plusieurs satellites), etc.

Dans les différentes applications susmentionnées, il est nécessaire de pouvoir générer avec le plus de précision possible un ou plusieurs champs d'ondes objectifs prédéterminés dans le milieu 2, par exemple pour pouvoir focaliser les ondes émises par un premier réseau de transducteurs  $T_1, T_2 \dots T_n$  en un ou plusieurs points du milieu 2 ou le cas échéant pour générer des champs d'ondes plus complexes.

L'intérêt de pouvoir effectuer une focalisation de grande précision peut être par exemple de réaliser une image d'une partie du milieu 2 avec une grande précision, ou de détruire sélectivement une partie du milieu 2 (thérapie ultrasonore), et encore d'envoyer un ou plusieurs messages à des endroits spécifiques du milieu et non dans le reste du milieu 2 (soit dans un souci de discrétion, soit dans un souci d'éviter les interférences entre les différents messages et de permettre ainsi une augmentation du débit de télécommunications).

Le premier réseau comprend un nombre  $n$  au moins égal à 1 (avantageusement au moins égal à 2) de transducteurs  $T_1-T_n$  capables d'émettre et de recevoir des ondes, par exemple ultrasonores.

Les signaux  $e_i(t)$  qui doivent être émis par les

transducteurs  $T_i$  pour obtenir le ou les champs d'ondes objectifs prédéterminés, sont obtenus au cours d'une étape d'apprentissage, au cours de laquelle un deuxième réseau de transducteurs  $T'1-T'm$  est utilisé.

5 Ce deuxième réseau comprend un nombre  $n$  au moins égal à 1 (avantageusement au moins égal 2) de transducteurs  $T'1-T'm$  de même type que les transducteurs  $T1-Tn$ .

Ce deuxième réseau peut être distinct du premier réseau  $T1-Tn$ , et n'être mis en place dans le milieu 2 qu'au  
10 cours de l'étape d'apprentissage, puis enlevé.

Il serait toutefois possible de concevoir de mettre en œuvre le procédé de la présente invention avec un ensemble de transducteurs restant en place en permanence dans le milieu, certains de ces transducteurs servant à  
15 constituer le premier réseau de transducteurs et d'autres de ces transducteurs servant à constituer le second réseau de transducteurs pendant la phase d'apprentissage. Au moins certains transducteurs pourraient d'ailleurs être communs aux premier et deuxième réseaux ou encore appartenir soit  
20 au premier réseau, soit au deuxième réseau suivant le champ d'ondes objectif que l'on cherche à obtenir (et notamment suivant le point du milieu 2 sur lequel on cherche à focaliser les ondes émises).

Les différents transducteurs  $T1-Tn$ ,  $T'1-T'm$  sont  
25 commandés par un dispositif de commande électronique 3 qui ne sera pas décrit en détails ici. Ce dispositif de commande peut par exemple être identique ou similaire au dispositif de commande décrit dans le document WO-A-02/32316 susmentionné lorsque le dispositif 1 est un  
30 dispositif d'imagerie ou de thérapie acoustique ultrasonore.

Les signaux  $e_i(t)$  déterminés au cours de l'étape d'apprentissage pour chaque transducteur  $T_i$  du premier



réseau permettent par exemple de générer dans le milieu 2 un champ d'ondes focalisé uniquement en un point où est situé l'un des transducteurs du deuxième réseau, par exemple le transducteur  $T'1$ .

5            Cette étape d'apprentissage peut bien entendu être renouvelée pour chacun des transducteurs  $T'1-T'm$  du deuxième réseau, de façon à déterminer à chaque fois des signaux  $e_i(t)$  permettant de focaliser le champ d'ondes sur l'un quelconque des points où est situé l'un des  
10 transducteurs  $T'j$  du deuxième réseau.

Dans tous les cas de figure, au cours d'une même étape d'apprentissage, on détermine les signaux  $e_i(t)$  qui doivent être émis par les transducteurs  $T_i$  du premier réseau pour obtenir des signaux objectifs  $o_j(t)$   
15 correspondant au champ d'ondes objectif au niveau de chaque transducteur  $T'j$  du deuxième réseau.

Le dispositif de commande 3 peut éventuellement avoir en mémoire, à l'avance, des valeurs initiales des signaux  $e_i(t)$  permettant d'obtenir approximativement le  
20 champ d'ondes souhaité.

Toutefois, dans un mode de réalisation préféré de l'invention, ces valeurs initiales des signaux  $e_i(t)$  sont déterminées au cours d'une étape initiale dans laquelle :

- on fait émettre simultanément par les  
25 transducteurs  $T_j$  du deuxième réseau, des signaux  $o_j(-t)$ , résultant de l'inversion temporelle des signaux objectifs  $o_j(t)$  (dans le cas où les signaux objectifs  $o_j(t)$  consistent soit en de simples impulsions à  $t=0$ , soit en des signaux plats, cette étape revient simplement à faire  
30 émettre les signaux objectifs  $o_j(t)$  par les transducteurs  $T'j$ ),

- on fait capter par les transducteurs  $T_i$  du premier réseau des signaux  $e_i(t)$  résultant du champ

d'ondes générés par les signaux  $o_j(-t)$ ,

- et on détermine la valeur initiale  $e_i(t)$  par inversion temporelle des signaux  $e'_i(t)$  susmentionnés :  $e_i(t) = e'_i(-t)$ .

5 Une fois déterminée la valeur initiale du signal  $e_i(t)$  pour chaque transducteur  $T_i$  du premier réseau, on procède à une ou plusieurs itérations de la séquence de correction suivantes :

10 (a) on fait émettre simultanément par les différents transducteurs  $T_i$  du premier réseau les signaux  $e_i(t)$ ,

(b) on fait capter, par les différents transducteurs  $T'_j$  du deuxième réseau, des signaux  $r_j(t)$  résultant du champ d'ondes générés par les signaux  $e_i(t)$ ,

15 (c) on détermine un signal de différence temporellement inversé  $d_j(-t)$  pour chaque transducteur  $j$  du deuxième réseau,  $d_j(-t)$  étant l'inversion temporelle de la différence  $d_j(t) = r_j(t) - o_j(t)$ ,

20 (d) on fait émettre simultanément le signal de différence temporellement inversé  $d_j(-t)$  par chaque transducteur  $j$  du deuxième réseau,

(e) on fait capter un signal  $c'_i(t)$  par chaque transducteur  $i$  du premier réseau à partir des ondes générées par les signaux de différence temporellement  
25 inversés  $d_j(-t)$ ,

(f) on détermine un signal de correction  $c_i(t) = \beta \cdot c'_i(-t)$  pour chaque transducteur  $i$  du premier réseau,  $c'_i(-t)$  étant l'inversion temporelle du signal capté  $c'_i(t)$  et  $\beta$  étant un nombre réel positif non nul  
30 choisi de façon que  $\beta < (\|\bar{e}\| \|\bar{d}\|) / (\|\bar{r}\| \|\bar{c}\|)$ , où  $\bar{e} = [e_i(t)]$ ,  $\bar{d} = [d_j(t)]$ ,

$\bar{r} = [r_j(t)]$ ,  $\bar{c} = [c'_i(t)]$  et  $\|\cdot\|$  désigne une norme vectorielle (par exemple telle que  $\|\bar{x}\| = \|[x_m]\| = \text{Max}(|x_m|)$ , où  $|x_m(t)|$  désigne



l'amplitude du signal  $x_m(t)$ ). La valeur de  $\beta$  définie ci-dessus (généralement supérieure à 1) permet au processus de correction de converger très rapidement vers des signaux  $e_i(t)$  répondant à l'objectif recherché, mais le coefficient  $\beta$  pourrait également être pris égal à 1 sans pour autant sortir du cadre de l'invention,

(g) corriger le signal  $e_i(t)$  en lui soustrayant  $c_i(t)$ .

A l'itération suivante de la séquence de correction, la valeur du signal  $e_i(t)$  utilisée à l'étape (a) est ensuite celle précédemment déterminée à l'étape (g) de la séquence de correction décrite ci-dessus.

L'expérience montre que le processus de correction converge très rapidement, en quelques millisecondes, même dans un milieu très dissipatif et/ou hétérogène.

Cette convergence rapide, qui ne nécessite par ailleurs pas de moyens de calcul lourds, permet le cas échéant au système de s'adapter en temps réel à des modifications du milieu lorsque le milieu est changeant, ce qui est notamment le cas dans les applications de télécommunications par voie radio ou par voie acoustique. Dans ce cas, le deuxième réseau de transducteurs ne sera pas enlevé après la ou les étapes d'apprentissage de départ, mais sera au contraire laissé en place de façon à pouvoir réitérer la ou les étapes d'apprentissage, à intervalles de temps réguliers ou non.

On notera que dans tout le processus d'apprentissage explicité ci-dessus, les signaux émis sont donnés à des coefficients multiplicatifs constants (non nuls) près.

Une fois la ou les étapes d'apprentissage terminées le dispositif de génération d'ondes 1 est capable de générer un ou plusieurs champs d'ondes prédéterminés dans le milieu 2 avec une très grande précision.

Par exemple, dans le cas où on aurait procédé à

plusieurs étapes d'apprentissage permettant de générer avec précision une impulsion localisée uniquement en un point occupé par un transducteur  $T_j$  du deuxième réseau, on peut ensuite :

- 5           - dans les applications d'imagerie, générer des impulsions localisées en des points quelconques du milieu 2 (en générant des signaux  $E_i(t)$  obtenus soit par des procédés simples d'interpolation entre les signaux d'émission  $e_i(t)$ , permettant de focaliser les ondes  
10 respectivement sur plusieurs transducteurs  $j$  du deuxième réseau, soit par des procédés plus complexes tels que ceux décrits par exemple dans le document WO-A-02/32316 susmentionné),
- dans les applications de thérapie ultrasonore,  
15 générer une impulsion d'ondes de grande amplitude en un point particulier du milieu destiné à être détruit, ce point particulier pouvant correspondre soit à l'emplacement d'un des transducteurs  $T_j$  du deuxième réseau, soit à un point différent du milieu 2, auquel cas les signaux  
20 permettant de générer cette impulsion sont déterminés comme expliqué au paragraphe précédent,
- dans les applications de télécommunications, générer un signal porteur d'informations en un point du milieu 2 (comme aux deux alinéas précédents, ce point du  
25 milieu 2 peut être l'un des points occupés par les transducteurs du deuxième réseau ou un autre point du milieu, auquel cas on détermine les signaux à émettre  $E_i(t)$  par interpolation ou par des procédés plus complexes tels que ceux décrits dans le document WO-A-02/32316 à partir  
30 des différents signaux  $e_i(t)$ , permettant de focaliser, les ondes sur les points occupés par les transducteurs  $T_j$  du deuxième réseau), ce signal porteur d'informations étant obtenu en faisant émettre par les transducteurs  $T_i$  des

signaux  $S_i(t) = E_i(t) \otimes S(t)$  égaux au produit de convolution des signaux  $E_i(t)$ , avec le signal  $S(t)$  porteur d'informations qui doit être transmis au point voulu.

REVENDICATIONS

1. Procédé pour générer un champ d'ondes objectif  
prédéterminé dans un milieu au moyen d'un premier réseau  
5 comprenant au moins un transducteur, ce procédé comprenant  
une étape d'apprentissage au cours de laquelle on  
détermine, en transmettant des ondes dans le milieu entre  
le premier réseau et un deuxième réseau comprenant au moins  
un transducteur, des signaux  $e_i(t)$  à émettre par chaque  
10 transducteur  $i$  du premier réseau pour générer ledit champ  
d'ondes prédéterminé dans le milieu,

caractérisé en ce que l'étape d'apprentissage comprend la  
séquence de correction suivante :

(a) faire émettre simultanément par chaque  
15 transducteur  $i$  du premier réseau un signal  $e_i(t)$  déterminé  
par avance et permettant de générer un champ d'ondes réel  
proche du champ d'ondes objectif dans le milieu, ce champ  
d'ondes objectif correspondant à un signal objectif  $o_j(t)$   
pour chaque transducteur  $j$  du deuxième réseau,

20 (b) faire capter par chaque transducteur  $j$  du  
deuxième réseau un signal  $r_j(t)$  résultant du champ d'ondes  
généré par les signaux  $e_i(t)$ ,

(c) déterminer un signal de différence  
temporellement inversé  $d_j(-t)$  pour chaque transducteur  $j$  du  
25 deuxième réseau,  $d_j(-t)$  étant l'inversion temporelle de la  
différence  $d_j(t) = r_j(t) - o_j(t)$ ,

(d) faire émettre simultanément le signal de  
différence temporellement inversé  $d_j(-t)$  par chaque  
transducteur  $j$  du deuxième réseau,

30 (e) faire capter un signal  $c'_i(t)$  par chaque  
transducteur  $i$  du premier réseau à partir des ondes  
générées par les signaux de différence temporellement  
inversés  $d_j(-t)$ ,

(f) déterminer un signal de correction  $c_i(t) = \beta \cdot c'_i(-t)$  pour chaque transducteur  $i$  du premier réseau,  $c'_i(-t)$  étant l'inversion temporelle du signal capté  $c'_i(t)$  et  $\beta$  étant un nombre réel positif non nul  
 5 choisi de façon que  $\beta < (\|\bar{e}\| \cdot \|\bar{d}\|) / (\|\bar{r}\| \cdot \|\bar{c}\|)$ , où  $\bar{e} = [e_i(t)]$ ,  $\bar{d} = [d_j(t)]$ ,  $\bar{r} = [r_j(t)]$ ,  $\bar{c} = [c'_i(t)]$  et  $\|\cdot\|$  désigne une norme vectorielle,

(g) corriger le signal  $e_i(t)$  en lui soustrayant  $c_i(t)$ .

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la  
 10 séquence de correction est répétée plusieurs fois.

3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la séquence de correction est précédée d'une étape initiale au cours de laquelle on détermine expérimentalement une première valeur du signal  
 15  $e_i(t)$  pour chaque transducteur  $i$  du premier réseau.

4. Procédé selon la revendication 3, dans lequel, au cours de l'étape initiale :

- on détermine l'inversion temporelle  $o_j(-t)$  du signal objectif pour chaque transducteur du deuxième  
 20 réseau,

- on fait émettre ladite inversion temporelle  $o_j(-t)$  du signal objectif par chaque transducteur  $j$  du deuxième réseau,

- on fait capter par chaque transducteur  $i$  du  
 25 premier réseau un signal  $e'_i(t)$  résultant du champ d'ondes généré par les signaux  $o_j(-t)$ ,

- et on détermine le signal  $e_i(t) = e'_i(-t)$  pour chaque transducteur du premier réseau,  $e'_i(-t)$  étant l'inversion temporelle du signal  $e'_i(t)$ .

30 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la norme vectorielle est définie comme suit :  $\|\bar{x}\| = \|[x_m]\| = \text{Max}(|x_m|)$ , où  $|x_m(t)|$  désigne l'amplitude du signal  $x_m(t)$ .

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le champ d'ondes est un champ d'ondes acoustiques.

7. Procédé selon l'une quelconque des  
5 revendications 1 à 5, dans lequel le champ d'ondes est un champ d'ondes électromagnétiques.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les ondes sont générées par un système de télécommunication.